

Zerstörungsfreie Bestimmung der Oberflächenhärtetiefe mittels Ultraschallverfahren - Erfahrungen und notwendige Weiterentwicklungen

Eckhardt SCHNEIDER, Manfred STROH,
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Saarbrücken
Yvan LEJEUNE, Qnet Engineering, Saarbrücken

Kurzfassung. Die drei auf dem Markt verfügbaren Ultraschallprüfsysteme zur Bestimmung der Randhärtungstiefe insbesondere von induktionsgehärteten Bauteilen nutzen die gleichen physikalischen Grundlagen und Messprinzipien, haben die gleiche Messgenauigkeit von ca. $\pm 0,15$ bis 0,2 Millimeter; sie unterscheiden sich im Preis, in der Signalverarbeitung und -darstellung und im Bedienungskomfort insbesondere bei der Parametrisierung und bei der Ergebnisarchivierung. Die Systeme ermöglichen die Bestimmung der Rht im Bereich von ca. 1,5 mm bis > 10 mm, wenn das Verhältnis der mittleren Korngröße des unbeeinflussten Grundgefüges zur Ultra-schallwellenlänge zwischen ca. 0,2 und 1 liegt, und der Härtegradient $> ca. 35$ HV pro 0,1 mm (besser pro halbe Ultraschallwellenlänge) ist. Das genutzte Ultraschall-rückstreuverfahren findet seine Anwendungsgrenzen, wenn Randhärtetiefen kleiner als ungefähr 1,5 mm ermittelt werden sollen und bei Stählen, die aufgrund der Abkühlbedingungen Zwischenstufengefüge ausbilden, sowie bei Stählen, die aus der Schmiedehitze abgeschreckt, angelassen und dann oberflächengehärtet werden und sehr feinkörniges (Korngröße kleiner als ca. 20 μm) Grundgefüge aufweisen. Zur Bestimmung von Rht kleiner ca. 1,5 mm, sowie zur Charakterisierung von Härtegradienten und auch von Spannungsgradienten bietet sich die Anwendung der elektromagnetischen, mikromagnetischen Verfahren an. Die Ultraschalltechnik bietet eine Alternative, wenn die Amplituden- und Phasenspektren ausgewertet werden. Die vorgestellten ersten Ergebnisse zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Ansätze. Softwareprogramme zur Nutzung der Modelle sind verfügbar, die Grundlagen der Bestimmung der Phasengeschwindigkeiten von Ultraschallwellen in Materialien mit tiefenabhängigen Änderungen der Dichten und materialspezifischen elastischen Kennwerte sind bekannt.

Einführung

Die Ultraschallrückstreuung wurde in den siebziger Jahren durch theoretische und experimentelle Arbeiten insbesondere zum Nachweis von Ungängen in grobkörnigen (austenitischen) Kraftwerkskomponenten weiterentwickelt. In den Achtzigern lag der Schwerpunkt bei der Detektion und der Darstellung der örtlichen Verteilung zweiter Phasen (z.B. Poren, Ausscheidungen) in keramischen Komponenten und Al-Bauteilen. 1988 wurden erste Prüfsysteme zur Bestimmung der Randhärtungstiefe (Rht) von induktionsgehärteten Drehkranzlagern eingesetzt. Zurzeit gibt es drei europäische Anbieter von Ultraschallsystemen zur Bestimmung der Dicke gehärteter Oberflächenschichten [1, 2, 3]. Sie finden ihre An-

wendung in klein- und mittelständischen Härtereibetrieben ebenso wie im Bereich der Fertigungs- und Qualitätskontrolle bei Automobilherstellern und großen Zulieferern.

Grundlagen

Streuung von Ultraschallwellen findet überall dort statt, wo sich die Materialdichte und/oder die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellen im Material verändern und die Größe dieses Bereiches d mit veränderten Eigenschaften (Streuer) kleiner als die Ultraschallwellenlänge λ ist und in definierten Verhältnissen d/λ steht. Die physikalischen Zusammenhänge der Ultraschallstreuung sind seit langem bekannt und vielfach veröffentlicht. Der Vollständigkeit halber werden die wichtigsten Zusammenhänge wiedergegeben:

Tabelle 1: Grundlegende Zusammenhänge zwischen der Amplitude des Schallimpulses A , dem Laufweg x , der Nahfeldlänge N , dem Schwächungskoeffizienten α , der Ultraschallfrequenz f , der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Longitudinal- und Transversalwelle, dem Durchmesser des Streuers d und der Materialdichte ρ .

$$A(x) = A_0 (N/x) \exp(-\alpha x)$$

$$\alpha = \alpha_{\text{Absorption}} + \alpha_{\text{Streuung}}$$

$$\alpha_{\text{Absorption}} \sim f$$

$$\lambda = v / f$$

$$\alpha_{\text{Streuung}}:$$

$$\text{Rayleigh Streuung: } d \ll \text{Wellenlänge: Streukoeffizient} = S d^3 f^4$$

$$\text{Resonante Streuung: } d \sim \text{Wellenlänge: Streukoeffizient} = T d f^2$$

$$\text{Streuparameter} = S \sim \text{Anisotropie}^2$$

$$S \sim 1/\rho^2$$

$$S \sim 1/v^4$$

$$S_{\text{Trans}} / S_{\text{Long}} = (3/4) (v_L / v_T)^3$$

$$\text{In Stahl- und Al-Bauteilen ist: } v_L \sim 2 \times v_T$$

$$S_{\text{Trans}} = (3/4) \times 8 \times S_{\text{Long}}$$

Transversalwellen werden also etwa sechsmal stärker gestreut als Longitudinalwellen. Das Einschallen von Transversalwellen setzt eine viskose Paste zur Übertragung der Scherkräfte vom piezoelektrischen Prüfkopf in die Materialoberfläche voraus. Die koppelmittelfrei arbeitenden elektromagnetischen Ultraschallwandler (EMUS) können bisher nicht zur Rht Bestimmung eingesetzt werden, da die Mittenfrequenzen zu gering, und damit die Wellenlängen zu groß sind für diese Anwendung. Die von Snellius beschriebenen Regeln der Reflexion, Brechung und Umwandlung von Wellen an Grenzflächen bringen den Vorteil, dass Longitudinalwellen mit Mittenfrequenzen von ca. 15 bis 50 MHz mittels Öl- oder Wasserkoppelschicht in das zu prüfende Bauteil unter einem Winkel so eingeschallt werden können, dass sich im Bauteil eine Transversalwelle ausbildet. Die Flüssigkeitskoppelschicht erleichtert die Relativbewegung des Prüfkopfes über der Oberfläche und ermöglicht bei Anwendungen in Tauchtechnik auch die Schallfeldfokussierung auf die Prüfzone. In der Mehrzahl aller Anwendungen wird der Ultraschallprüfkopf in einen Vorlaufkeil aus einem ausgewählten Kunststoff mit dem entsprechend berechneten Einschallwinkel eingebaut. Die Mittenfrequenz des Longitudinalwellenprüfkopfes ist so gewählt, dass die Struktur der gehärteten oberflächennahen Schicht wenige, die Struktur des Grundmaterials jedoch größtmögliche Streueffekte verursacht. Streuung findet an jeder Korngrenze im Schallstrahl und in alle Raumrichtungen statt. Die zum Prüfkopf rückgestreuten Signale werden gleichgerichtet und zum Erzielen eines deutlichen Rückstreusignals mit gutem Signal-Rausch-Abstand aufaddiert. Die Laufzeit zwischen Oberflächenecho und Streusignal wird

gemessen und aus dem bekannten Einschallwinkel der Longitudinalwelle bzw. dem sich daraus ergebenden Winkel, unter dem sich die Transversalwelle in der oberflächennahen Schicht ausbreitet, wird die Dicke der gehärteten Schicht berechnet. Alle Ultraschallsysteme zur Rht Bestimmung nutzen dieses Prinzip. Das Ergebnis der Ultraschallstreuung ist also nicht die Tiefe, in der noch ein bestimmter Volumenanteil an martensitischem Gefüge vorliegt, ist nicht die Tiefe, in der die Oberflächenhärte auf einen prozentualen Anteil abgefallen ist, sondern ist die Tiefe, in der das vom Härtingsprozess unbeeinflusste Grundgefüge vorliegt. Die Abbildung 1 soll das Prinzip verdeutlichen.

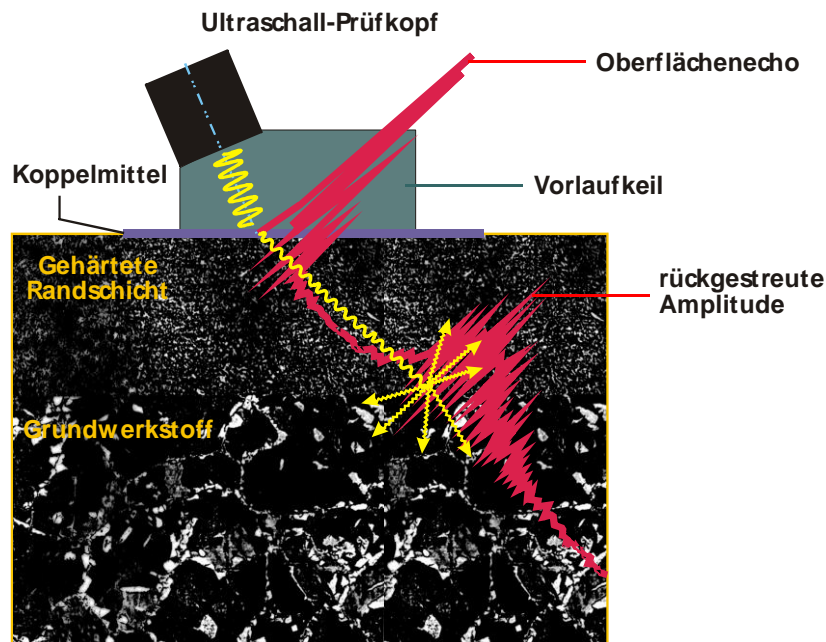


Abb. 1: Schematische Darstellung des Funktions- und Messprinzips der Ultraschallverfahren zur Rht-Bestimmung.

Erreichter Stand

Die drei verfügbaren Prüfsysteme nutzen die gleichen physikalischen Grundlagen und Messprinzipien, haben die gleiche Messgenauigkeit von ca. $\pm 0,15$ bis $0,2$ Millimeter; sie unterscheiden sich im Preis, in der Signalverarbeitung und -darstellung und im Bedienungs-komfort insbesondere bei der Parametrisierung und bei der Ergebnisarchivierung.

Die Systeme ermöglichen die Bestimmung der Dicke von induktionsgehärteten Bauteiloberflächen im Bereich von ca. $1,5$ mm bis > 10 mm, wenn das Verhältnis der mittleren Korngröße des unbeeinflussten Grundgefüges zur Ultraschallwellenlänge zwischen ca. $0,2$ und 1 liegt, und der Härtegradient $> ca. 35$ HV pro $0,1$ mm (besser pro $0,5 \lambda$) ist. Ultraschallprüfköpfe gibt es in großer Vielfalt, die Vorlaufkörper müssen möglichst gut an die Bauteiloberflächengeometrie angepasst sein. Die Systeme können zur Bestimmung von Härtetiefen $< ungefähr 1$ mm nicht eingesetzt werden, weil in diesem Fall Rückstreusignal und Oberflächenecho nicht hinreichend genau separiert werden können, so dass eine Laufzeitmessung zur Bestimmung der Rht nicht möglich ist.

Da die Amplituden der Rückstreusignale sehr viel kleiner sind als ein Rückwandecho aus gleicher Tiefe, gilt es, möglichst viel Schallenergie in die Übergangszone gehärtet/ungehärtet zu bringen. Die Notwendigkeit einer möglichst guten Anpassung der Vorlaufkeil-Geometrie an die Oberflächenkontur des Prüfteils wird häufig unterschätzt. Die Abbildung 2 zeigt Beispiele von Vorlaufkörpern und eine Skizze, die ein anderes, häufig vorkommendes Missverständnis klärt: die Wellenumwandlung der eingeschallten Longi-

tudinalwelle (Vorteil: einfache Schalleinprägung und Prüfkopfbewegung) in eine Transversalwelle (Vorteil: deutlich größerer Streueffekt als Longitudinalwelle) hat zur Folge, dass sich die Transversalwelle unter einem bestimmten Winkel in der gehärteten Zone ausbreitet. Demzufolge ist das Ergebnis der Rht-Bestimmung der Wert an der Stelle, wo die Transversalwelle das Grundgefüge trifft und nicht der Rht-Wert an der Prüfkopfposition.

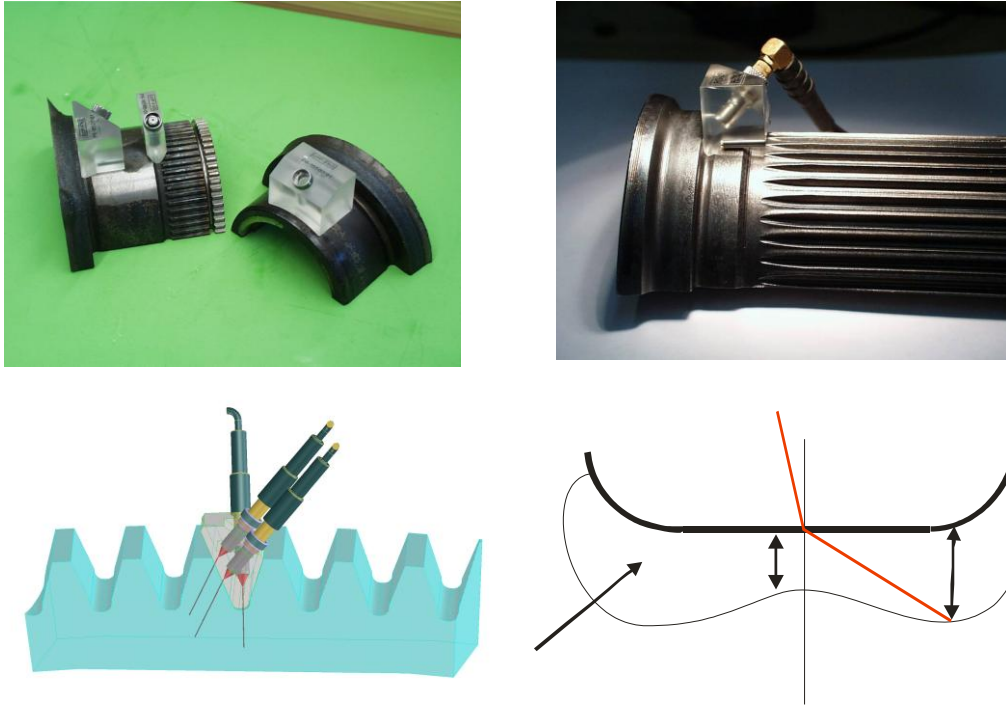


Abb.2: Vorlaufkörper und Skizze eines Ultraschallstrahlverlaufes in einer gehärteten oberflächennahen Zone.

Die Ultraschallrückstreuverfahren können an allen härtbaren Stählen zuverlässig eingesetzt werden, wenn die mittlere Korngröße vor dem Induktionshärten \geq ca. $20 \mu\text{m}$ ist und beim Härtungsprozess ausschließlich martensitische Umwandlung stattfindet. In einem solchen Fall ergibt sich die in Abbildung 3 oben gezeigte Mikrostruktur. Innerhalb einer schmalen Übergangszone, hier bei $2,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, verändert sich das Gefüge vom martensitischen Zustand in den ferritisch/perlitischen Zustand des Grundgefüges. Die Härteverlaufskurve zeigt dann einen scharfen Übergang von der Oberflächenhärte zur Härte des Grundgefüges. Durch Abweichung bei der Hitzeeinbringung oder Verringerung der Abkühlrate kann es vorkommen, dass sich ein bainitisches oder Zwischenstufengefüge ausbildet. Dieses Gefüge hat je nach Ausbildungsgrad eine Kornstruktur mit ähnlichen mittleren Korngrößen wie das Grundgefüge, so dass Rückstreuung im Zwischenstufengefüge stattfinden kann. Im mittleren Teil der Abbildung 3 ist ein entsprechendes Schlibfbild dargestellt. Die Ultraschallrückstreusignale führen zu einer falschen Rht Angabe von $2,9 \text{ mm}$, während sich aus dem Schlibfbild und der Härteverlaufskurve ein Wert von $3,3 \text{ mm}$ ergibt.

In jüngster Vergangenheit findet der Werkstoff 42CrMoV zunehmend Verwendung. Dieser Werkstoff bietet den Vorteil, dass ein Wärmebehandlungsschritt eingespart werden kann; die Bauteile werden gleich aus der Schmiedehitze abgeschreckt, angelassen und dann oberflächengehärtet. Dieser Werkstoff bildet bei dieser Wärmebehandlungsvariante ein sehr gleichförmiges feinkörniges Grundgefüge mit mittleren Korngrößen kleiner als $20 \mu\text{m}$ aus. Im unteren Teil der Abbildung 3 ist ein Schlibfbild einer 42CrMoV Probe wiedergegeben. In der oberflächennahen Zone liegt Martensit, ab einer Tiefe von ca. $3,2 \text{ mm}$ das Grundgefüge aus angelassenem Martensit vor. In einigen der bisher untersuchten 42CrMoV -

Proben wurde auch eine Zwischenstufe metallographisch nachgewiesen. Aufgrund der geringen mittleren Korngröße sowohl der Zwischenstufe als auch des Grundgefüges ist die Ultraschall-Bestimmung der Rht von induktionsgehärteten Komponenten dieses Werkstoffes nicht zuverlässig möglich.

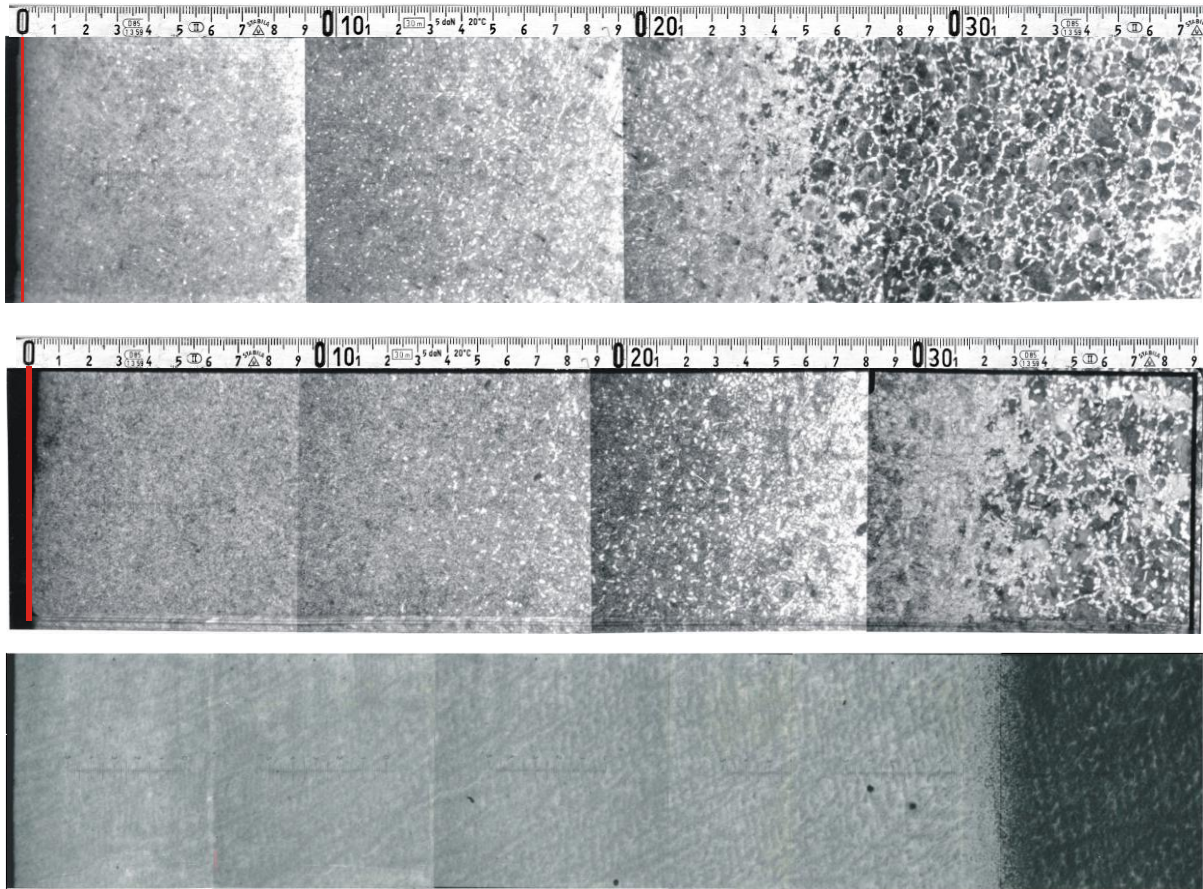


Abb. 3 oben: Schliffbild (M 100:1) eines scharfen Überganges von der gehärteten Zone (Martensit) zum Grundgefüge (Ferrit/Perlit). Ultraschallergebnis: Rht = 2,6 mm, Schliffbild und Härteprofilkurve: 2,6 mm.
 Mitte: Schliffbild (M 100:1) eines Überganges von der gehärteten Zone (Martensit) über Zwischenstufengefüge zum Grundgefüge. Ultraschallergebnis: Rht = 2,9 mm, aus Schliffbild und Härteverlaufskurve: 3,3 mm. unten: Schliffbild (M 100:1) eines Überganges von der gehärteten Zone (Martensit) zum Grundgefüge aus angelassenem Martensit. Diese Gefügestände stellen sich häufig bei induktionsgehärteten 42CrMoV Proben ein.

Die mittels Ultraschallrückstreuung ermittelte Rht ist die Tiefe, in der das von der Wärmebehandlung unbeeinflusste Grundgefüge vorliegt. Da diese Tiefe ebenso wie die Tiefe, in der ein bestimmter prozentualer Anteil Martensit vorliegt sowie die Tiefe, bei der die Oberflächenhärte auf einen bestimmten Anteil zurückgegangen ist, von den gleichen Material- und Härtingsprozessparametern beeinflusst werden, kann eine Korrelation zwischen den drei genannten Messwerten erwartet werden. Solche Korrelationen wurden mehrfach im Kundenauftrag an repräsentativen Teilen aus der Serienfertigung ermittelt; der festgestellte Korrekturwert kann bei der Auswertung der Ultraschallrückstreuung berücksichtigt werden, so dass das vom Gerät angezeigte Ergebnis die Tiefe anzeigt, in der der Härtewert oder der Volumenanteil an Martensit vorliegt. Das bisher interessanteste Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. An jeweils zwei vom Hersteller zur Verfügung gestellten Proben mit gleichen Tiefen, in denen die Oberflächenhärte auf 400 HV abgefallen ist, wurden immer größere Tiefen mit der Ultraschallrückstreuung (UT) ermittelt. Dieser Befund ist zu erwarten, denn das unbeeinflusste Grundgefüge liegt immer

tiefer als die Tiefe mit einem Härtewert zwischen dem Oberflächenwert und dem Härtewert des Grundgefüges. Überraschend, und die Ursachen sind noch nicht klar, ist die unterschiedliche Korrelation für Härtetiefen kleiner und größer von ca. 4 mm. Bei den Proben mit dem Rht Wert von 4 mm stimmen das Ultraschall- und das Ergebnis aus der Härteverlaufskurve ideal überein.

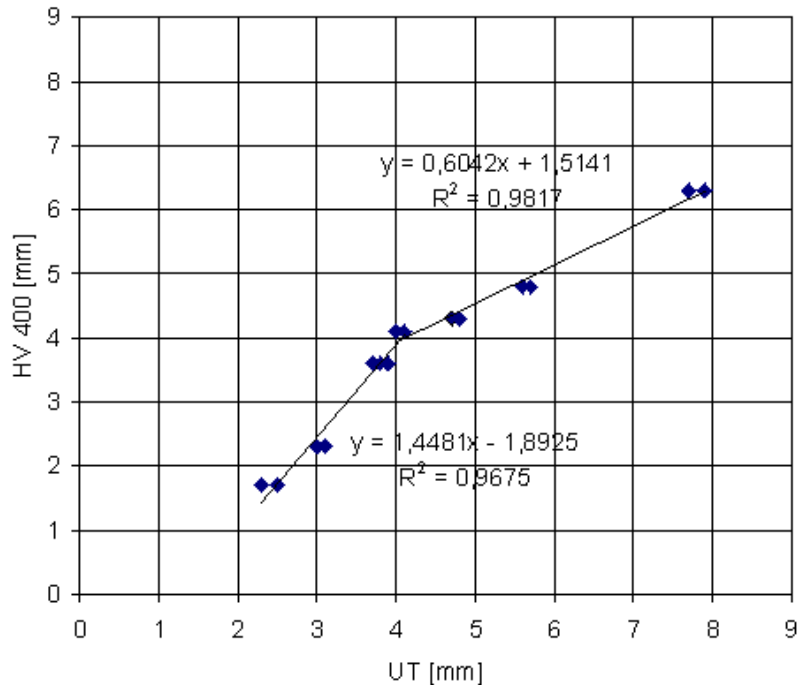


Abb. 4: Gegenüberstellung der mittels Ultraschallrückstreuung (UT) bestimmten Rht und dem aus der Härteverlaufskurve ermittelten Wert der Tiefe, in der die Oberflächenhärte auf 400 HV abgesunken ist.

Weitere Entwicklungen

Das Ultraschallrückstreuverfahren findet seine Anwendungsgrenzen, wenn Randhärtetiefen kleiner als ungefähr 1,5 mm ermittelt werden sollen und bei Stählen, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und/oder aufgrund der Vorbehandlung und/oder aufgrund der Abkühlbedingungen Zwischenstufengefüge ausbilden, sowie wenn das Grundgefüge eine mittlere Korngröße kleiner als ca. 20 μm hat. Zur Rht-Bestimmung in diesen Fällen, sowie zur Charakterisierung von Härtegradienten und auch von Spannungsgradienten bietet sich die Anwendung der elektromagnetischen, mikromagnetischen Verfahren an. Insbesondere die mikromagnetischen Verfahren, die mehrere voneinander unabhängige elektromagnetische, magnetoelastische und mikromagnetische Messgrößen aufnehmen, haben Vorteile, weil sie aufgrund der Vielzahl der einzelnen Messgrößen die Unterscheidung unterschiedlicher Einflussgrößen möglich macht und somit die quantitative Bestimmung von Härtetiefe und Härte und des Eigenspannungszustandes in unterschiedlichen Tiefen erlauben. Diese Verfahren müssen kalibriert werden und sind daher überall dort wirtschaftlich einsetzbar, wo große Stückzahlen der gleichen Komponente mit vergleichbaren Herstellungsroutinen untersucht werden müssen.

Die Ultraschalltechnik bietet eine Alternative, wenn die Amplituden- und Phasenspektren ausgewertet werden. Wie aus Abbildung 5 deutlich wird, ändert sich die Transversalwellengeschwindigkeit mit der Änderung des Martensitgehaltes von etwa 20 bis 100 % im Gefüge um rund 3 ‰ und um etwa 0,41 ‰, wenn sich die Härte um 10 HV-Werte verändert. An standardisierten Härtevergleichsplatten wurde die gleiche Änderung von 0,41

% pro 10 HV auch für den Härtebereich 250 HV bis 650 HV gemessen [4]. Vergleichbare Befunde liegen auch für die Abhängigkeiten der Longitudinalwellengeschwindigkeit vor.

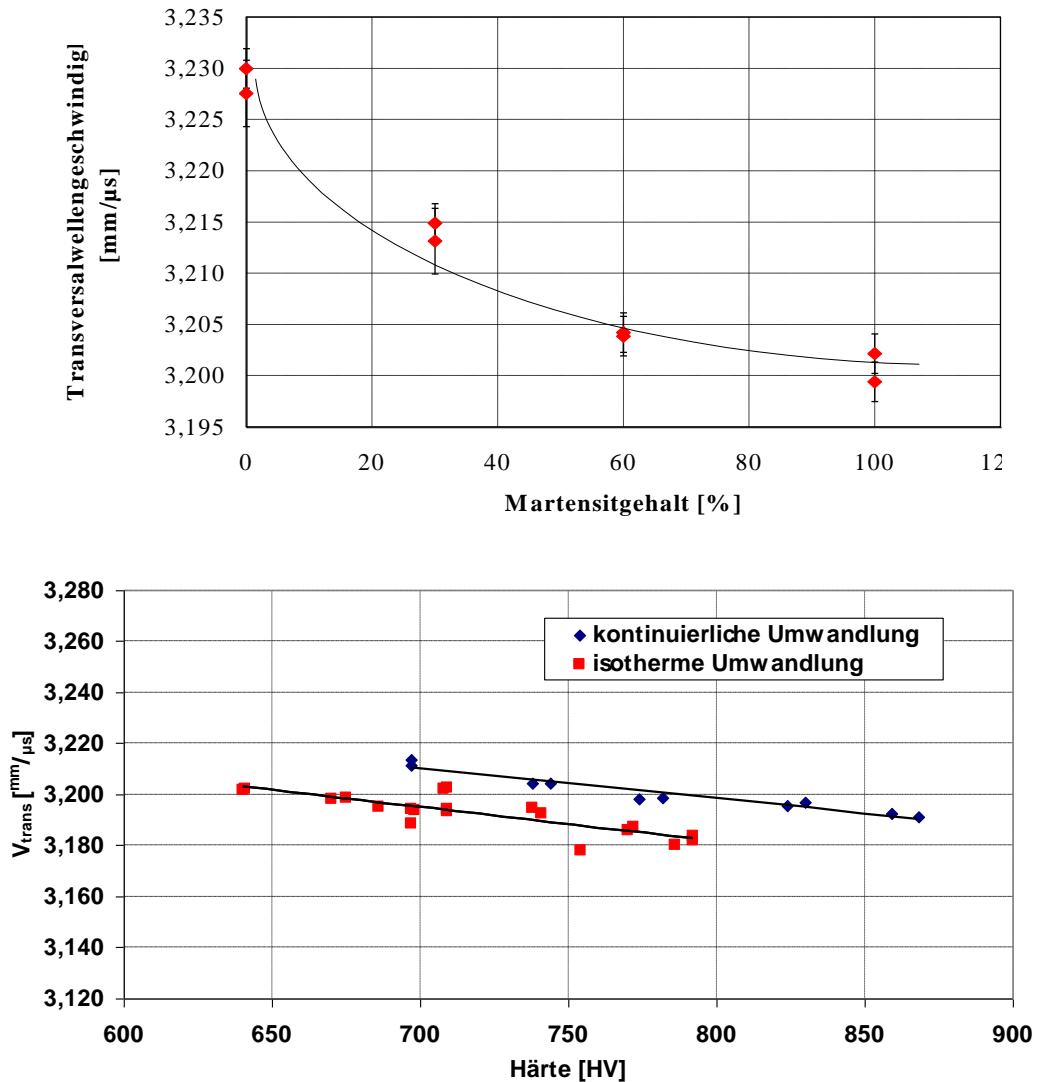


Abb. 5: Änderung der Transversalwellengeschwindigkeit mit dem Martensitgehalt (oben) und der Härte.

Moderne Messsysteme bieten Signalverarbeitungsroutinen und ermöglichen Laufzeitmessungen mit hinreichender Auflösung und Genauigkeit, um diese Abhängigkeiten auszunutzen. In der Geophysik wurden Modelle entwickelt, die den Einfluss der einzelnen Schichtdicke sowie der schichtspezifischen Dichten und elastischen Eigenschaften auf die Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Oberflächen- und freien Wellen beschreiben [5, 6]. Eine einfache Anpassung der Modellparameter an die Situation eines Stahles mit einer lasergehärteten Oberflächenschicht von ca. 0,4, 0,6 und 0,8 mm Dicke zeigt sehr gute Übereinstimmungen mit der experimentell festgestellten Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Rayleighwelle. Die Abbildung 6 zeigt als ein repräsentatives Ergebnis die Änderung der Rayleighwellengeschwindigkeit als Funktion der Frequenz von ca. 2 bis 6 MHz und die Ergebnisse der Modellrechnung. Die Messungen wurden an drei verschiedenen Proben mit einer angegebenen Härtetiefe von ca.

0,6 mm durchgeführt. Die Übereinstimmung des Modellergebnisses mit den experimentell festgestellten ist weniger gut bei Randhärtungstiefen von 0,9 und 1 mm Dicke [4].

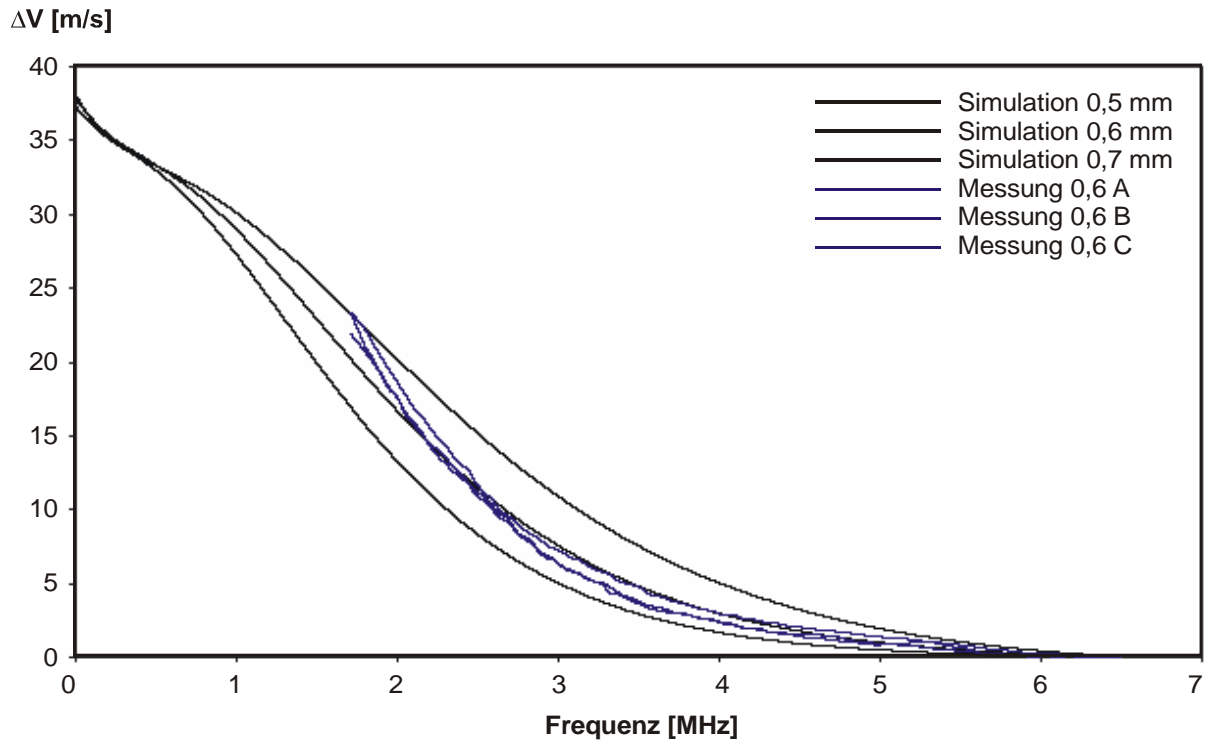


Abb. 6: Änderung der Rayleighwellengeschwindigkeit als Funktion der Frequenz von ca. 2 bis 6 MHz und die Ergebnisse der Modellrechnung. Die Messungen wurden an drei verschiedenen Proben mit einer angegebenen Härtetiefe von ca. 0,6 mm durchgeführt.

Diese ersten Ergebnisse zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Ansätze. Softwareprogramme zur Nutzung dieser geophysikalischen Modelle sind verfügbar, die Grundlagen der Bestimmung der Phasengeschwindigkeiten von Ultraschallwellen in Materialien mit tiefenabhängigen Änderungen der Dichte und materialspezifischen elastischen Kennwerte sind bekannt. Die notwendigen Anpassungen der Sensorik und der Messtechnik bedürfen lediglich einer möglichst konkreten Formulierung des Bedarfs in den einschlägigen Industriezweigen.

Referenzen

- [1] IZFP Rht Prüfgerät 3121; <http://www.izfp.fraunhofer.de>
- [2] Krautkrämer USLT 2000 Version 2.1.2; <http://www.GEInspectionTechnologies.com>
- [3] TRAPUS, <http://www.metalscan.fr>
- [4] Willms, R: IZFP Diplomarbeit (2006)
- [5] Herrmann, R. B.: Computer Programs in Seismology, An Overview of Synthetic Seismogram Computation, Version 3.30, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University (2005)
- [6] Herrmann, R. B.; Ammon, C. J.: Computer Programs in Seismology, Surface Waves, Receiver Functions and Cristal Structure, Version 3.30, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Saint Louis University, Department of Geosciences, Penn State University (2004)